

Verfahren zur Erzeugung einer Einhüllenden

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur automatischen Erzeugung einer Einhüllenden für ein rechnerverfügbares Konstruktionsmodell, das durch eine vorgegebene Vernetzung in Finite Elemente zerlegt ist.

Unter einer Einhüllenden wird eine rechnerverfügbare und näherungsweise Beschreibung der Oberfläche des vorgegebenen Konstruktionsmodells durch eine Menge von Flächenelementen verstanden. Die Einhüllende approximiert die Oberfläche mit einer vorgegebenen Maximalabweichung und vernachlässigt Löcher, Aussparungen, Bohrungen, Taschen, Rillen und andere Unregelmäßigkeiten, wenn deren Abmessungen kleiner als die vorgegebene Maximalabweichung sind.

Eine solche Einhüllende wird benötigt, um physikalische Vorgänge an der Oberfläche eines technischen Systems durch eine Finite-Elemente-Simulation nachzubilden. Hierfür wird das technische System durch ein rechnerverfügbares Konstruktionsmodell nachgebildet. Beispielsweise ist das modellierte System ein Motor oder eine Karosserie eines Kraftfahrzeugs, und die Geräuschemission von der Oberfläche des Motors bzw. der Karosserie wird durch eine Akustik-Simulation vorhergesagt. In der Akustik-Simulation werden nur Vorgänge auf der Oberfläche und der angrenzenden Umgebung berücksichtigt, nicht

aber Vorgänge im Inneren des Motors bzw. der Karosserie. Damit die Rechenzeit der Akustik-Simulation möglichst gering ist, approximiert die Einhüllende die Oberfläche nur so genau wie für die Simulation nötig.

Ein Software-Werkzeug für Akustik- und andere Simulationen namens „Virtual.Lab“ wird unter <http://www.lmsintl.com>, abgefragt am 24. 10. 2003, beschrieben. Erwähnt wird die Erzeugung einer Einhüllenden, dort „acoustic surface meshing process“ genannt, aus einer vorgegebenen Vernetzung. Aus einer Vernetzung eines beispielhaften Antriebstrangs mit 150.000 Finiten Elementen wird eine Einhüllende mit 5.000 Flächenelementen erzeugt. Nicht offenbart wird, wie die Einhüllende erzeugt wird.

In DE 10023377 C2 wird ein Verfahren zur Finite-Elemente-Simulation beschrieben. Ein vorgegebenes zwei- oder dreidimensionales Simulationsgebiet wird mit quadratischen Flächenelementen bzw. würfelförmigen Volumenelementen überdeckt. Ermittelt wird, welche der Gitterzellen ganz, teilweise oder gar nicht im Simulationsgebiet liegen. Wie dies geschieht, wird nicht offengelegt. Im Simulationsgebiet werden anschließend approximierende Funktionen mit Hilfe von B-Splines über den Gitterpunkten definiert, und die Simulation wird mit Hilfe dieser Funktionen durchgeführt.

Aus DE 10056107 A1 ist ein Verfahren zur Ermittlung von Klappergeräuschen an Kraftfahrzeugen bekannt. Ein Konstruktionsmodell eines Fahrzeugs wird in Elemente und Gitter unterteilt. Weiterhin wird der Definitionsbereich des Modells in Unter-Definitionsbereiche unterteilt, und die Elemente und Gitter eines Unter-Definitionsbereichs werden jeweils separat untersucht.

In DE 19919891 A1 wird die Erzeugung eines virtuellen Windkanals z. B. für ein Kraftfahrzeug beschrieben. Ein vorgegebe-

nes Konstruktionsmodell wird vernetzt (eine „Masche“ wird erzeugt), beispielsweise ein Oberflächenmodell mit 60.000 dreieckigen Flächenelementen. Für diese Vernetzung werden vorzugsweise kommerzielle Werkzeuge verwendet. Bei Bedarf wird das Konstruktionsmodell verfeinert, z. B. in Bereichen mit Verwirbelungen.

Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, ein mit geringer Rechenzeit durchführbares Verfahren zur automatischen Erzeugung einer Einhüllenden, welche die Oberfläche eines Konstruktionsmodells mit vorgegebener Maximalabweichung approximiert, bereitzustellen.

Die Aufgabe wird durch das Verfahren nach Anspruch 1 gelöst. Vorteilhafte Ausgestaltungen sind in den Unteransprüchen angegeben.

Vorgegeben ist eine Vernetzung des Konstruktionsmodells. Die Vernetzung besteht aus Finiten Elementen mit Knotenpunkten. Das Verfahren umfaßt folgende Schritte:

- Ermittelt wird ein Quader, in dem die Vernetzung des Konstruktionsmodells vollständig enthalten ist.
- Dieser Quader wird in Volumenelemente zerlegt. Die Zerlegung ist eine vollständige, so daß jeder Punkt des Quaders und damit jeder Punkt des Konstruktionsmodells in ein Volumenelement fällt. Der Quader wird so zerlegt, daß jede Kante jedes dieser Volumenelemente kürzer als oder genauso lang wie eine vorgegebene Schranke ist. Diese Schranke ist kleiner oder gleich der einzuhaltenden Maximalabweichung und kleiner oder gleich der für die nachfolgende Simulation geforderte Feinheit der Einhüllenden.
- Für jedes Volumenelement dieses Quaders wird geprüft, ob das Volumenelement mit mindestens einem ermittelten Finiten Element überlappt. Eine Überlappung liegt bereits vor,

wenn das Finite Element und das Volumenelement einen einzigen Punkt gemeinsam haben.

- Die Menge der überlappenden Volumenelemente bildet einen geometrischen Körper. Dieser Körper wird ermittelt.
- Der Körper wird nach außen durch die äußeren Begrenzungsflächen der außenliegenden Volumenelemente begrenzt. Diese Begrenzungsflächen werden ermittelt.
- Die gesuchte Einhüllende wird aus der Menge der dergestalt ermittelten Begrenzungsflächen zusammengesetzt.

Die erfindungsgemäß erzeugte Einhüllende weicht von der zu approximierenden Oberfläche höchstens um eine vorgegebene Maximalabweichung ab. Die Zerlegung des Quaders, der das Konstruktionsmodell vollständig enthält, wird mit einer vorgegebenen Genauigkeit durchgeführt. Die Zerlegung wird so durchgeführt, daß die größte Kantenlänge der Volumenelemente kleiner oder gleich der Maximalabweichung ist. Diese größte Kantenlänge ist eine obere Grenze für die Abweichung zwischen der Einhüllenden, die aus den außenliegenden Begrenzungsflächen der überlappenden Volumenelemente zusammengesetzt wird, und der durch die Vernetzung approximierten tatsächlichen Oberfläche des Konstruktionsmodells. Weil jede Kante kleiner oder gleich der vorgegebenen Schranke ist, ist die Maximalabweichung höchstens so groß wie diese vorgegebene Schranke. Denn die Kanten der Begrenzungsflächen sind höchstens so lang wie die maximale Kantenlänge der Volumenelemente. Weil überlappende Volumenelemente ausgewählt werden und keine anderen, stellt das Verfahren sicher, daß der Abstand zwischen der approximierenden Vernetzung und der Einhüllenden höchstens die maximale Kantenlänge und damit kleiner oder gleich der vorgegebenen Maximalabweichung ist.

Das Verfahren macht es überflüssig, die vorgegebene Vernetzung des Konstruktionsmodells zu verändern. Dadurch werden Rechenschritte und somit Verarbeitungszeit eingespart. Diese Einsparung ist um so größer, je feiner die vorgegebene Vernetzung im Vergleich zur Maximalabweichung ist. Das Verfahren erfordert bei N Quadern und M Finiten Elementen maximal $M * N$ Prüfschritte.

Das erfindungsgemäße Verfahren hängt nicht von der Art ab, wie das Konstruktionsmodell vernetzt wurde. Das Verfahren läßt sich insbesondere sowohl dann anwenden, wenn die Vernetzung des Konstruktionsmodells aus Flächenelementen besteht, als auch dann, wenn sie aus Volumenelementen besteht. Das Verfahren läßt sich auch für jede Form der Flächenelemente anwenden. Der Quader wird völlig unabhängig von der Vernetzung des Konstruktionsmodells in Volumenelementen zerlegt. Dadurch wird die Einhüllende so erzeugt, wie die nachfolgende Simulation dies erfordert. Diese nachfolgende Simulation kann eine andere sein als diejenige, für welche die vorgegebene Vernetzung erzeugt wurde. Beispielsweise wurde die Vernetzung für eine Simulation der im System auftretenden Spannungen erzeugt, die Einhüllende wird hingegen für eine Akustik-Simulation verwendet.

Nur diejenigen Begrenzungsflächen der überlappenden Volumenelemente werden ausgewählt, die den durch die überlappenden Volumenelemente gebildeten Körper nach außen begrenzen. Dadurch wird erreicht, daß die innere Struktur des Konstruktionsmodells bei der Erzeugung der Einhüllenden nicht berücksichtigt wird. Weiterhin wird erreicht, daß die erfindungsgemäß erzeugte Einhüllende ist daher immer geschlossen und regelmäßig ist.

Falls das vorgegebene Konstruktionsmodell Löcher aufweist, z. B. Bohrungen oder Taschen, so hängt es von deren Abmessungen

ab, ob Approximationen dieser Löcher in der Einhüllenden auftreten oder ob die Löcher bei der Approximation nicht berücksichtigt werden. Falls der Durchmesser des Lochs größer ist als die größte Kantenlänge der Volumenelemente des Quaders, so liegt mindestens ein Volumenelement des Quaders ganz oder teilweise in dem Loch, und Begrenzungsflächen dieses Quaders sind außenliegende und gehören zur Einhüllenden. Ansonsten wird das Loch vernachlässigt. Durch die frei wählbare Größe der Volumenelemente des Quaders wird also gesteuert, welche Löcher berücksichtigt und welche vernachlässigt werden.

Die erzeugte Einhüllende besitzt wesentlich weniger Knotenpunkte als die vorgegebene Vernetzung des Konstruktionsmodells. Eine Finite-Elemente-Simulation mit den Knotenpunkten der Einhüllenden verwendet ein Gleichungssystem mit weniger Unbekannten und erfordert daher weniger Rechenzeit. Diese Einsparung fällt insbesondere dann ins Gewicht, wenn die Simulation mehrmals durchgeführt wird, z. B. um verschiedene Konstruktionsstände miteinander zu vergleichen.

Die Ausgestaltung nach Anspruch 2 erfordert besonders wenig Rechenzeit. Der Quader wird so zerlegt, daß die kürzeste Kante jedes Volumenelements größer oder gleich der längsten Kante jedes Finiten Elements der vorgegebenen Vernetzung ist. Die Zerlegung des Quaders ist frei wählbar, und die Genauigkeit, mit der die Einhüllende die Oberfläche des Konstruktionsmodells approximieren soll, wird durch die Anforderungen der Simulation, für welche die Einhüllende verwendet wird, vorgegeben. Daher ist es meistens möglich, daß die Volumenelemente des Quaders längere Kanten als die Flächenelemente der Vernetzung des Konstruktionsmodells haben.

Die Prüfung, ob ein Finites Element der Vernetzung und ein Volumenelement des Quaders überlappen oder nicht, wird durch die Ausgestaltung nach Anspruch 2 auf besonders einfache Wei-

se durchgeführt. Geprüft wird, ob mindestens ein Knotenpunkt des Finiten Elements im Volumenelement liegt. Wird ein solcher Knotenpunkt gefunden, so wird die Prüfung abgebrochen, und entschieden wird, daß das Volumenelement mit dem Finiten Element überlappt. Falls kein Knotenpunkt des Finiten Elements im Volumenelement liegt, so kann auch kein anderer Punkt im Volumenelement liegen. Dies folgt aus der Ausgestaltung, daß die Kanten des Volumenelements länger als die des Finiten Elements sind. Weil kein anderer Punkt des Finiten Elements im Volumenelement liegt, überlappen Finites Element und Volumenelement nicht. Weil nur die Knotenpunkte untersucht werden und keine anderen Punkte, wird besonders wenig Rechenzeit benötigt.

Im Folgenden wird ein Ausführungsbeispiel der Erfindung näher beschrieben, dabei zeigen:

Fig. 1. Knotenpunkte einer vorgegebenen unregelmäßigen Fläche;

Fig. 2. ein die Fläche enthaltendes Rechteck;

Fig. 3. eine Zerlegung des Rechtecks in kleine Rechtecke;

Fig. 4. die Rechtecke der Zerlegung, die Knotenpunkte enthalten;

Fig. 5. die entstehende massive zweidimensionale Fläche;

Fig. 6. die erzeugte Einhüllende.

Das erfindungsgemäße Verfahren wird zunächst vereinfacht an einem zweidimensionalen Beispiel veranschaulicht. In diesem Beispiel ist eine Einhüllende für eine unregelmäßige Fläche in der Ebene zu erzeugen. Diese unregelmäßige Fläche tritt in dieser Veranschaulichung an die Stelle des vorgegebenen Konstruktionsmodells. Die zu erzeugende Einhüllende ist ein Streckenzug in dieser Ebene. Fig. 1 zeigt einige der Knotenpunkte derjenigen Flächenelemente, die zu einer Vernetzung der Fläche gehören. Der Übersichtlichkeit halber sind viele Knotenpunkte nicht dargestellt. Die durch die Knotenpunkte gebildeten Flächenelemente der unregelmäßigen Fläche sind ebenfalls nicht dargestellt.

Ein Rechteck wird ermittelt, in dem die vorgegebene unregelmäßige Fläche und damit die Vernetzung enthalten ist. Die unregelmäßige Fläche und das ermittelte Rechteck werden in Fig. 2 gezeigt. Dieses Rechteck tritt an die Stelle des Quaders.

Das Rechteck wird in gleich große Rechtecke mit vorgegebenen Kantenlängen zerlegt. Fig. 3 zeigt diese Rechtecke der Zerlegung, die an die Stelle der Volumenelemente treten, sowie die Knotenpunkte der Fig. 1.

Geprüft wird, welche Rechtecke der Zerlegung jeweils mindestens einen Knotenpunkt der unregelmäßigen Fläche umfassen. Diese überlappenden Rechtecke sind in Fig. 4 schraffiert dargestellt.

Die in Fig. 4 schraffiert dargestellten Rechtecke bilden eine zweidimensionale Fläche. Die Hohlräume in dieser zweidimensionalen Fläche werden ausgefüllt. Dadurch entsteht die in Fig. 5 gezeigte massive zweidimensionale Fläche.

Die Begrenzungslinien dieser massiven Fläche werden zur gesuchten Einhüllenden zusammengesetzt. Diese Begrenzungslinien, die einen Streckenzug bilden, werden in Fig. 6 durch fette Linien gezeigt.

Das nun folgende Ausführungsbeispiel bezieht sich auf einen Bestandteil eines neuen Kraftfahrzeuges als dem technischen System. Die erzeugte Einhüllende wird beispielsweise dazu verwendet, die Schallemission von einem festen Körper, z. B. einem Motor oder einer Karosserie eines Kraftfahrzeuges, durch eine Finite-Elemente-Simulation zu untersuchen. Die Schallemission wird durch Körperschall hervorgerufen. Dieser entsteht durch Zug- und/oder Schubspannungen in Festkörpern.

Die Schallemission wird durch Vibrationen an der Oberfläche des Motors oder der Karosserie hervorgerufen. Diese Vibrationen wirken auf die umgebende Luft ein. Die Vibrationen werden in einen Anteil senkrecht zur Oberfläche und einen parallel zur Oberfläche zerlegt. Nur die Anteile der Vibrationen senkrecht zur Oberfläche werden in der Akustik-Simulation berücksichtigt, nicht aber die Anteile parallel zur Oberfläche.

Aus der Strukturmechanik des Motors und seiner Oberfläche resultiert eine Verteilung der Schnelle der Vibrationen. Diese Schnelle wird durch eine Akustik-Simulation ermittelt. Mit der Schnelle wird die Auslenkungsgeschwindigkeit ds/dt bezeichnet, wobei $s(t)$ die Auslenkung der Schallwelle senkrecht zur Oberfläche in Abhängigkeit von der Zeit t ist und wobei gilt:

$$ds/dt = -\omega * A * \sin(\omega t + kx + \phi).$$

Die Strukturmechanik des Motors wird mit einer ersten Finite-Elemente-Simulation berechnet. Die berechnete Strukturmechanik umfaßt die Verschiebung, die Geschwindigkeit oder die Be-

schleunigung z. B. der Verschiebung der Oberfläche. Aus dieser wird die Schallschnelle der Oberfläche berechnet.

Vorgegeben ist ein rechnerverfügbares Konstruktionsmodell eines zu konstruierenden oder zu untersuchenden Systems, z. B. des Motors. Dieses Konstruktionsmodell ist auf einem Datenspeicher einer Datenverarbeitungsanlage abgespeichert und hat vorzugsweise die Form eines dreidimensionalen CAD-Modells. Das Konstruktionsmodell wird beispielsweise mit Hilfe von Punkten, Kurven, Vektoren, Linien, Konturen, polygonale Netze, gekrümmten Oberflächen und/oder Volumenelementen in dem Datenspeicher repräsentiert. Das erfindungsgemäße Verfahren wird mit dieser Datenverarbeitungsanlage oder einer anderen, die Lesezugriff auf den Datenspeicher hat, durchgeführt.

Die Methode der Finiten Elemente ist aus „Dubbel – Taschenbuch für den Maschinenbau“, 20. Auflage, Springer-Verlag, 2001, C 48 bis C 50, aus B. Klein: „FEM – Grundlagen und Anwendungen der Finite-Elemente-Methode“, Vieweg-Verlag, 3. Auflage, 1999, aus T. R. Chandrupalta & A. D. Belegundu: „Introduction to Finite Element in Engineering“, Prentice-Hall, 1991, sowie aus DE 19927941 C1 bekannt. Durch eine Finite-Elemente-Simulation werden physikalische Vorgänge unterschiedlicher Arten untersucht, beispielsweise Schwingungsvorgänge, z. B. die Geräuschemission von der Oberfläche eines Motors oder einer Karosserie eines Kraftfahrzeuges.

In dem vorgegebenen Konstruktionsmodell wird eine bestimmte Menge von Punkten festgelegt, die Knotenpunkte heißen. Als Finite Elemente werden diejenigen Flächen- oder Volumenelemente bezeichnet, deren Ecken durch Knotenpunkte definiert werden. Die Knotenpunkte bilden ein Netz in dem Konstruktionsmodell, weswegen der Vorgang, Knotenpunkte festzulegen und Finite Elemente zu erzeugen, Vernetzen und die Finiten Elemente Vernetzung des Modells genannt werden. In DE

10010408 A1 und DE 19933314 A1 werden Verfahren zum Vernetzen eines gegebenen Konstruktionsmodells beschrieben.

Möglich ist, das Konstruktionsmodell beim Vernetzen vollständig in Finite Elemente zu zerlegen. In diesem Fall gehört jeder Punkt des Konstruktionsmodells zu mindestens einem Finiten Element. Oft reicht aber eine Näherungslösung aus, die Knotenpunkte einspart und damit zu einem kleineren Gleichungssystem führt. Falls beispielsweise die Karosserie eines Kraftfahrzeugs untersucht wird, so reicht es meist aus, die Blechteile der Karosserie durch Flächenelemente näherungsweise zu vernetzen. Fügeverbindungen zwischen Blechteilen, z. B. Schweiß- oder Klebenähte, werden mittels Volumenelementen vernetzt. Dadurch lassen sich Vorgänge in den Fügeverbindungen, z. B. Verschiebungen und Querspannungen, genauer untersuchen. In manchen Anwendungen reicht es aus, die Oberfläche des Konstruktionsmodells zu vernetzen, beispielsweise durch eine „Triangulierung“ mittels dreieckiger Flächenelemente. Das erfindungsgemäße Verfahren läßt sich ohne Modifikation für jede dieser Vernetzungen anwenden. Eine beliebige Vernetzung des Konstruktionsmodells wird dem Verfahren vorgegeben.

Je nach Problemstellung werden die Verschiebungen dieser Knotenpunkte und/oder Rotationen der Finiten Elemente in diesen Knotenpunkten und/oder die Spannungen in bestimmten Punkten dieser Finiten Elemente, nämlich in den Integrationspunkten, als Unbekannte eingeführt. Gleichungen werden aufgestellt, welche z. B. die Verschiebungen, Rotationen und/oder Spannungen innerhalb eines Finiten Elements näherungsweise beschreiben. Weitere Gleichungen resultieren aus Abhängigkeiten zwischen verschiedenen Finiten Elementen. Insgesamt wird ein oft sehr umfangreiches Gleichungssystem mit den Knotenpunkt-Verschiebungen, Knotenpunkt-Rotationen, Spannungen in Integrationspunkten oder weitere Größen als Unbekannte aufgestellt

und numerisch gelöst. Aus der Lösung des Gleichungssystems lassen sich Aussagen über das physikalische Verhalten des Systems gewinnen.

Die Einhüllende läßt sich auch für eine Simulation gemäß der Boundary-Elemente-Methode verwenden. Diese Methode wird in Dubbel, a.a.O., C50 - C52, beschrieben. Wie eine Akustik-Simulation mit der Finite-Elemente-Methode oder der Boundary-Elemente-Methode durchgeführt wird, ist z. B. in Dubbel, a.a.O., O33 - O35, beschrieben.

Zur Durchführung des erfindungsgemäßen Verfahrens wird lediglich die Vernetzung des Konstruktionsmodells benötigt. Weitere Informationen über das Konstruktionsmodell, z. B. Krümmungsradien oder Fasen oder die Oberflächenbeschaffenheit, erfordert das Verfahren nicht. Die Datenverarbeitung, die das Verfahren durchführt, liest die Vernetzung des Konstruktionsmodells ein. Hierbei werden die im Folgenden beschriebenen Informationen über Knotenpunkte und über die Finiten Elemente eingelesen.

Ein Knotenpunkt ist durch eine eindeutige Kennung, z. B. eine fortlaufende Nummer, und seiner Position gekennzeichnet. Die Kennung ist in der Vernetzung eindeutig, weswegen zwei verschiedene Knotenpunkte stets zwei verschiedene Kennungen haben. Die Position des Knotenpunkts wird durch je eine x-, y- und z-Koordinate in einem dreidimensionalen Koordinatensystem gekennzeichnet. Beispielsweise um Verschiebungen und Verformungen unter dem Einfluß eines Lastfalls zu untersuchen, kann vorgesehen sein, daß zwei Knotenpunkte zweier verschiedener Finiten Elemente vor der Verformung dieselbe Position und - daher dieselben x-, y- und z-Koordinaten haben. Diese beiden Knotenpunkte werden durch verschiedene Kennungen unterschieden.

Man unterscheidet zweidimensionale Finite Elemente, die im folgenden Flächenelemente genannt werden, und dreidimensionale Finite Elemente, die im Folgenden Volumenelemente heißen. Gekrümmte Flächen und Körper, die durch gekrümmte Flächen im Raum angenähert werden, werden oft mittels Flächenelementen vernetzt. Die gebräuchlichsten Flächenelemente sind Dreiecke und Vierecke. Alle Ecken der Flächenelemente sind Knotenpunkte. Manchmal werden Vierecke mit sechs Knotenpunkten verwendet. Neben rechteckigen Flächenelementen können auch andere viereckige Flächenelemente vorgesehen sein. Flächenelemente werden vorzugsweise durch eine isoparametrische Darstellung beschrieben, die z. B. aus T. R. Chandrupalta & A. D. Belegundu, a.a.O., bekannt ist.

Als Volumenelemente werden in der Regel Würfel und andere Quader verwendet, also Volumenelemente mit sechs ausschließlich rechteckigen Begrenzungsflächen. Derartige Volumenelemente werden oft als Hexaeder bezeichnet. Typischerweise sind die acht Ecken des Quaders Knotenpunkte des Volumenelements. Verwendet werden Volumenelemente mit acht bis zwanzig Knotenpunkten.

Jedes Finite Element ist durch eine in der Vernetzung eindeutige Kennung, z. B. eine fortlaufende Nummer, und durch seine Knotenpunkte gekennzeichnet. Vorzugsweise umfassen die Informationen über das Finite Element eine Auflistung der Kennungen seiner Knotenpunkte sowie eine Kennzeichnung, von welcher Art das Finite Element ist.

Als ersten Schritt bei der Durchführung des Ausführungsbeispiels liest die Datenverarbeitung, die das Verfahren ausführt, die Vernetzung ein. Ein Quader wird ermittelt, in dem die Vernetzung des Konstruktionsmodells vollständig enthalten ist. Vorzugsweise wird diese Quader so gelegt, daß jede seiner Begrenzungsflächen senkrecht auf einer Koordinatenachse

liegt und somit seine Kanten achsenparallel ausgerichtet sind. Jede der sechs Begrenzungsflächen liegt dann in einer der folgenden Ebenen:

$$\begin{aligned} & \{ (x,y,z) \mid x = x_{\min} \}, \{ (x,y,z) \mid x = x_{\max} \}, \\ & \{ (x,y,z) \mid y = y_{\min} \}, \{ (x,y,z) \mid y = y_{\max} \}, \\ & \{ (x,y,z) \mid z = z_{\min} \}, \{ (x,y,z) \mid z = z_{\max} \}. \end{aligned}$$

Der Wert x_{\min} wird mit Hilfe der Positionen der Knotenpunkte der eingelesenen Vernetzung berechnet, nämlich als der kleinste Wert aller x -Koordinaten der Knotenpunkte. Entsprechend wird x_{\max} als der größte Wert aller x -Koordinaten der Knotenpunkte berechnet. Auf analoge Weise werden y_{\min} , y_{\max} , z_{\min} und z_{\max} berechnet. Alle Finiten Elemente der vorgegebenen Vernetzung liegen innerhalb dieses Quaders, weil jeder Eckpunkt eines Finiten Elements ein Knotenpunkt der Vernetzung ist und weil die Berechnung von x_{\min} , ..., z_{\max} sicherstellt, daß alle Knotenpunkte innerhalb des Quaders liegen.

Der Quader, in dem die Vernetzung enthalten ist, wird in Volumenelemente zerlegt. Vorzugsweise haben alle Volumenelemente die gleichen Abmessungen und die gleiche geometrische Form und grenzen nahtlos aneinander. Beispielsweise wird der Quader in gleich große Würfel zerlegt. In dem Falle, daß ein harmonischer Schwingungsvorgang durch eine Finite-Elemente-Simulation auf Basis der Einhüllenden untersucht werden soll, wird wie folgt festgelegt, wie der Quader in Würfel zerlegt wird: Eine halbe Welle des Schwingungsvorgangs wird in der Finite-Elemente-Simulation durch einen Streckenzug mit drei gleich langen Strecken approximiert, eine volle Welle demnach durch sechs Strecken. Daher wird der Quader in Würfel zerlegt, deren Kantenlänge ein Sechstel der Wellenlänge, also der Länge der vollen Welle, ist. Diese Wellenlänge hängt von der Frequenz des Schwingungsvorgangs und von dem Medium, in

dem die Schwingung sich ausbreitet, ab, und ist daher bekannt.

Geprüft wird, ob die kürzeste Kantenlänge der Volumenelemente des Quaders größer ist als die längste Kante der Vernetzung des Konstruktionsmodells. Ist dies nicht der Fall, so wird die Vernetzung des Konstruktionsmodells verfeinert.

Vorzugsweise werden zunächst die Kantenlängen der Volumenelemente in x-, y- und z-Richtung ermittelt oder vorgegeben. Anschließend werden die Längen der drei Kanten des Quaders in x-, y- und z-Richtung durch die vorgegebenen oder ermittelten Kantenlängen der Volumenelemente dividiert. Die drei Quotienten werden auf die nächsten natürlichen Zahlen N_x , N_y und N_z aufgerundet. Dadurch wird die Anzahl der Volumenelemente in x-, y- und z-Richtung berechnet. Eine tatsächliche Kantenlänge eines Volumenelements kann daher von der vorgegebenen leicht abweichen.

Die Volumenelemente, in die der Quader zerlegt wird, werden fortlaufend durchnummeriert. Dadurch erhält jedes dieser Volumenelemente eine eindeutige Kennung. Vorzugsweise ist die Kennung ein Tripel (n_x, n_y, n_z) , das die relative Position des Volumenelements im Quader angibt. Das Volumenelement, das den Eckpunkt $(x_{\min}, y_{\min}, z_{\min})$ des Quaders enthält, erhält die Kennung $(1, 1, 1)$. Das Volumenelement, das den Eckpunkt $(x_{\max}, y_{\max}, z_{\max})$ des Quaders enthält, erhält die Kennung (N_x, N_y, N_z) , wobei N_x , N_y und N_z die Anzahl der Volumenelemente in x-, y- bzw. z-Richtung angibt.

Als nächstes wird ermittelt, welche Volumenelemente des Quaders mit Finiten Elementen der Vernetzung überlappen. Hierzu wird eine Datenstruktur in Form einer dreispaltigen Tabelle erzeugt. Anstelle einer Tabelle kann auch eine verkettete Liste als Datenstruktur verwendet werden, wobei jedes Listenelement drei Einträge ermöglicht.

In der ersten Spalte der Tabelle werden die Kennungen der Volumenelemente des Quaders eingetragen, in die zweite Spalte in jeder Zeile eine Null. Anschließend wird eine Datenstruktur, in der die Knotenpunkte der Vernetzung abgespeichert sind, durchlaufen. Für jeden Knotenpunkt der Vernetzung wird ermittelt, in welches Volumenelement des Quaders dieser Knotenpunkt fällt. Wie oben dargelegt, liegt jeder Knotenpunkt in dem Quader, und der Quader wird vollständig und ohne Rest in Volumenelemente zerlegt. Möglich ist, daß ein Knotenpunkt auf der Begrenzungsfläche zweier aneinander angrenzenden Volumenelementen liegt. In der zweiseitigen Tabelle wird für die Volumenelemente, in die der Knotenpunkt fällt, der alte Eintrag in der zweiten Spalte um Eins vergrößert. Nach Ende - des Schrittes gibt die Tabelle für jedes Volumenelement an, wie viele Knotenpunkte in ihm liegen.

Die Menge der überlappenden Volumenelemente ist genau die Menge derjenigen Volumenelemente, die mindestens einen Knotenpunkt enthalten und in der zweiten Spalte der Tabelle einen Wert größer Null besitzen. Diese Menge bildet einen dreidimensionalen Körper, der vollständig im Quader liegt. Dieser Körper kann Hohlräume enthalten, die im nächsten Schritt gefüllt werden. Nach Auffüllung der Hohlräume entsteht ein massiver Körper. Die dritte Spalte der Tabelle legt fest, welche Volumenelemente des Quaders zu diesem massiven Körper gehören und welche nicht. Hierzu wird in die dritte Spalte der Tabelle eine Eins eingetragen, wenn in der zweiten Spalte ein Wert größer Null steht.

Die Volumenelemente, die keinen Knotenpunkt enthalten und daher in der zweiten Spalte eine Null haben, gehören entweder zu Hohlräumen im Körper gehören oder liegen außerhalb des Körpers. Um diese beiden Fälle zu unterscheiden, wird wie folgt vorgegangen: Für jedes Volumenelement VE, das keinen

Knotenpunkt enthält und für das in der dritten Spalte noch kein Eintrag vorgenommen wurde, werden die sechs angrenzenden Volumenelemente ermittelt, also diejenigen, die mit einer Begrenzungsfläche an VE angrenzen. Ermittelt wird, welche dieser sechs angrenzenden Volumenelemente mindestens einen Knotenpunkt enthalten und welche keinen. Für die an VE angrenzenden Volumenelemente, die keinen Knotenpunkt enthalten, werden wiederum die angrenzenden Volumenelemente ohne Knotenpunkte ermittelt, die nicht an VE angrenzen. Diese Ermittlungen werden fortgesetzt, bis entweder ein zusammenhängender Hohlraum, der VE enthält, ermittelt wurde oder bis der Rand des Quaders erreicht ist. Alle Volumenelemente eines zusammenhängenden Hohlraums werden dadurch „gefüllt“, daß in der dritten Spalte jeweils eine Eins eingetragen wird. Wird hingegen ausgehend von VE der Rand des Quaders erreicht, so liegt VE nicht im Inneren des Körpers, und in der dritten Spalte werden für VE und für die angrenzenden Volumenelemente ohne Knotenpunkte je eine Null eingetragen.

Das Auffüllen von Hohlräumen läßt sich auch auf anderem Wege durchführen. Zunächst wird in der dritten Spalte für alle Volumenelemente mit je mindestens einem Knotenpunkt je eine Eins eingetragen. Anschließend werden nacheinander alle Volumenelemente ermittelt, die am Rande des Quaders liegen, d. h. die mindestens eine Begrenzungsfläche besitzen, die in einer Begrenzungsfläche des Quaders liegt. Diejenigen dieser Volumenelemente, die keinen Knotenpunkt der Vernetzung enthalten, sind außenliegende Volumenelemente und erhalten eine Null in der dritten Spalte. Diejenigen Volumenelemente, die an diese Volumenelemente am Rande angrenzen und ebenfalls keine Knotenpunkte enthalten, werden ermittelt und erhalten ebenfalls eine Null in der dritten Spalte. Wiederholt werden angrenzende Volumenelemente ohne Knotenpunkte ermittelt, bis alle Vo-

lumenelemente untersucht sind und die dritte Spalte vollständig ausgefüllt ist.

Nach dem Auffüllen liegt eine aus Volumenelementen des Quaders bestehende Vernetzung eines massiven dreidimensionalen Körpers vor. Diejenigen Begrenzungsflächen dieser Vernetzung werden ermittelt, die diesen Körper nach außen begrenzen. Vorzugsweise wird hierzu aus dem Volumenmodell, das ist die Vernetzung des massiven Körpers mit Volumenelementen, ein Oberflächenmodell, das ist eine Vernetzung der Oberfläche mit Flächenelementen, erzeugt. Dieser Schritt wird z. B. mit einem Präprozessor für Finite-Elemente-Werkzeuge durchgeführt. Als erstes wird eine Beschreibung der aus Volumenelementen bestehenden Vernetzung des Körpers in einer Datei abgespeichert, z. B. im Datenformat „NASTRAN Bulk Data“. Der Präprozessor „MEDINA“ vermag eine Vernetzung aus einer Datei einzulesen, wenn diese in einem standardisierten Datenformat, z. B. in NASTRAN Bulk Data, vorliegt. Eine Beschreibung von MEDINA ist unter

http://www.c3pdm.com/des/products/medina/documentation/medina-DINA4_e.pdf, abgefragt am 27. 11. 2003, verfügbar. MEDINA besitzt eine Funktionalität, um aus einem Volumenmodell ein Oberflächenmodell zu erzeugen. Dieses Oberflächenmodell ist die gesuchte Einhüllende.

Vorzugsweise wird das Oberflächenmodell geglättet („relaxiert“), wobei Treppenstufen in der Vernetzung entfernt werden. Auch die Glättung wird z. B. mit einer entsprechenden Funktionalität von MEDINA durchgeführt.

Die erfindungsgemäß erzeugte Einhüllende läßt sich auch dazu verwenden, Ergebnisse der Finite-Elemente-Simulation, z. B. das Schwingungsverhalten oder die Schallausbreitung, zu visualisieren. Für diese Visualisierung werden nur die berechneten physikalischen Größen an der Oberfläche des untersuchten

Systems benötigt, nicht aber die innere Struktur. Mit der Einhüllenden wird eine Datenreduktion durchgeführt. Die Berechnungsergebnisse werden auf die Flächenelemente der Einhüllenden umgerechnet, z. B. indem per Interpolation die Werte der Größen in den Eckpunkten dieser Flächenelemente berechnet werden. Die berechneten Größen werden vorzugsweise auf einem Bildschirm einer Datenverarbeitungsanlage oder auf einem Papierausdruck visualisiert. Infolge der Datenreduktion läßt sich die Visualisierung schneller erzeugen und verändern, z. B. wenn ein Benutzer die Visualisierung auf dem Bildschirm drehen oder vergrößern will.

Patentansprüche

1. Verfahren zur automatischen Erzeugung einer Einhüllenden, welche die Oberfläche eines rechnerverfügbaren Konstruktionsmodells eines technischen Systems approximiert, wobei eine aus Finiten Elementen mit Knotenpunkten bestehende Vernetzung des Konstruktionsmodells vorgegeben ist und das Verfahren die Schritte umfaßt:
 - Ermitteln eines Quaders, in dem die Vernetzung vollständig enthalten ist,
 - Zerlegen des Quaders in Volumenelemente mit Kanten, die höchstens genauso lang wie eine vorgegebene Schranke sind,
 - Für jedes Volumenelement Prüfen, ob das Volumenelement mit mindestens einem Finiten Element der Vernetzung überlappt,
 - Ermitteln eines Körpers, der durch die überlappenden Volumenelemente gebildet wird,
 - Ermitteln derjenigen Begrenzungsflächen, die den Körper nach außen begrenzen, und
 - Zusammensetzen der Einhüllenden aus den ermittelten Begrenzungsflächen.

2. Verfahren nach Anspruch 1,

dadurch gekennzeichnet,

daß

- der Quader so zerlegt wird, daß die kürzeste Kante jedes Volumenelements größer oder gleich der längsten Kante jedes Finiten Elements ist
- dann, wenn es einen Knotenpunkt eines Finiten Elements gibt, der in einem Volumenelement liegt, Entscheiden, daß das Volumenelement mit dem Finiten Element überlappt, und
- dann, wenn kein Knotenpunkt eines Finiten Elements in einem Volumenelement liegt, Entscheiden, daß dieses Volumenelement mit dem Finiten Element nicht überlappt.

3. Verfahren nach Anspruch 1 oder Anspruch 2,

dadurch gekennzeichnet, daß

- die Finiten Elemente der Vernetzung Rechtecke
- und die Volumenelemente Quader sind.

4. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3,

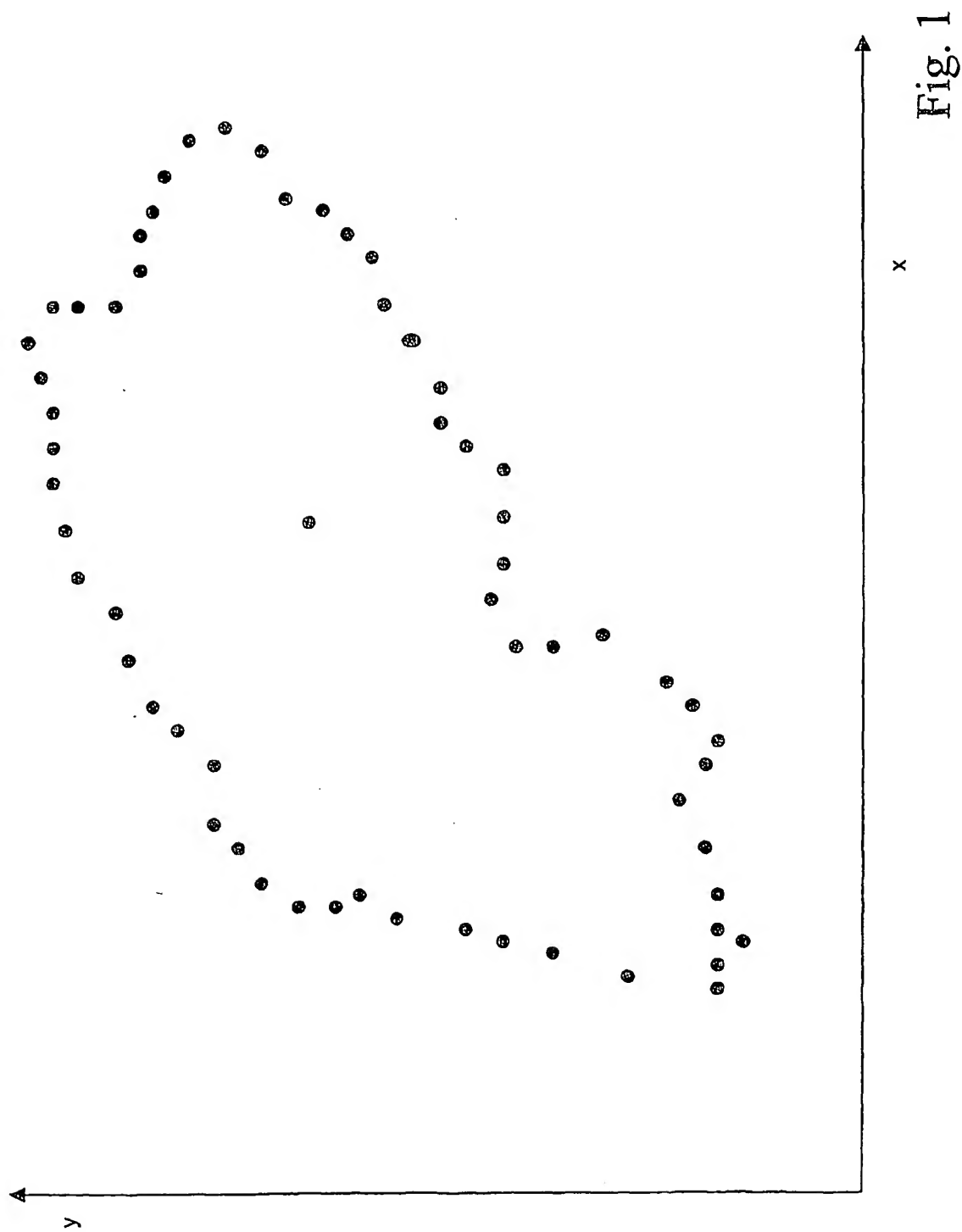
dadurch gekennzeichnet,

daß

- eine Wellenlänge eines harmonischen Schwingungsvorgangs vorgegeben ist,

- als Volumenelemente Würfel verwendet werden, deren Kantenlänge ein vorgegebener Bruchteil der Wellenlänge ist, und
 - unter Verwendung der Einhüllenden eine Finite-Elemente-Simulation des Schwingungsvorgangs durchgeführt wird.
5. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet, daß beim Ermitteln der Begrenzungsflächen
- diejenigen Volumenelemente des Quaders ermittelt werden, die Hohlräume im Inneren des ermittelten Körpers bilden,
 - diese Hohlräume gefüllt werden und
 - die Begrenzungsflächen des dadurch erzeugten massiven dreidimensionalen Körpers ermittelt werden.
6. Computerprogramm-Produkt, das direkt in den internen Speicher eines Computers geladen werden kann und Softwareabschnitte umfaßt, mit denen ein Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 5 ausgeführt werden kann, wenn das Produkt auf einem Computer läuft.
7. Computerprogramm-Produkt, das auf einem von einem Computer lesbaren Medium gespeichert ist und das von einem Computer lesbare Programm-Mittel aufweist, die den Computer veranlassen, ein Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 5 auszuführen.

1/6



2/6

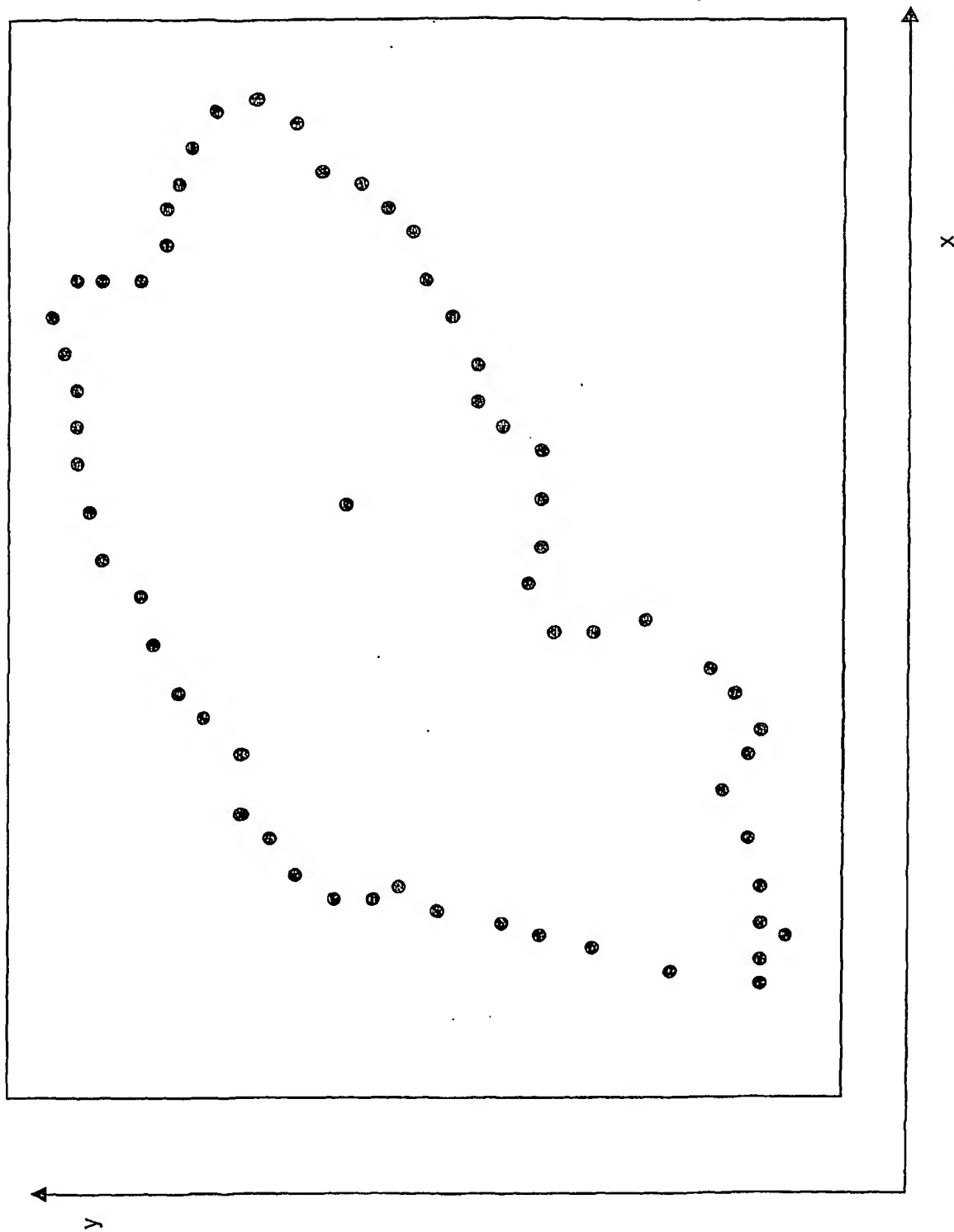


Fig. 2

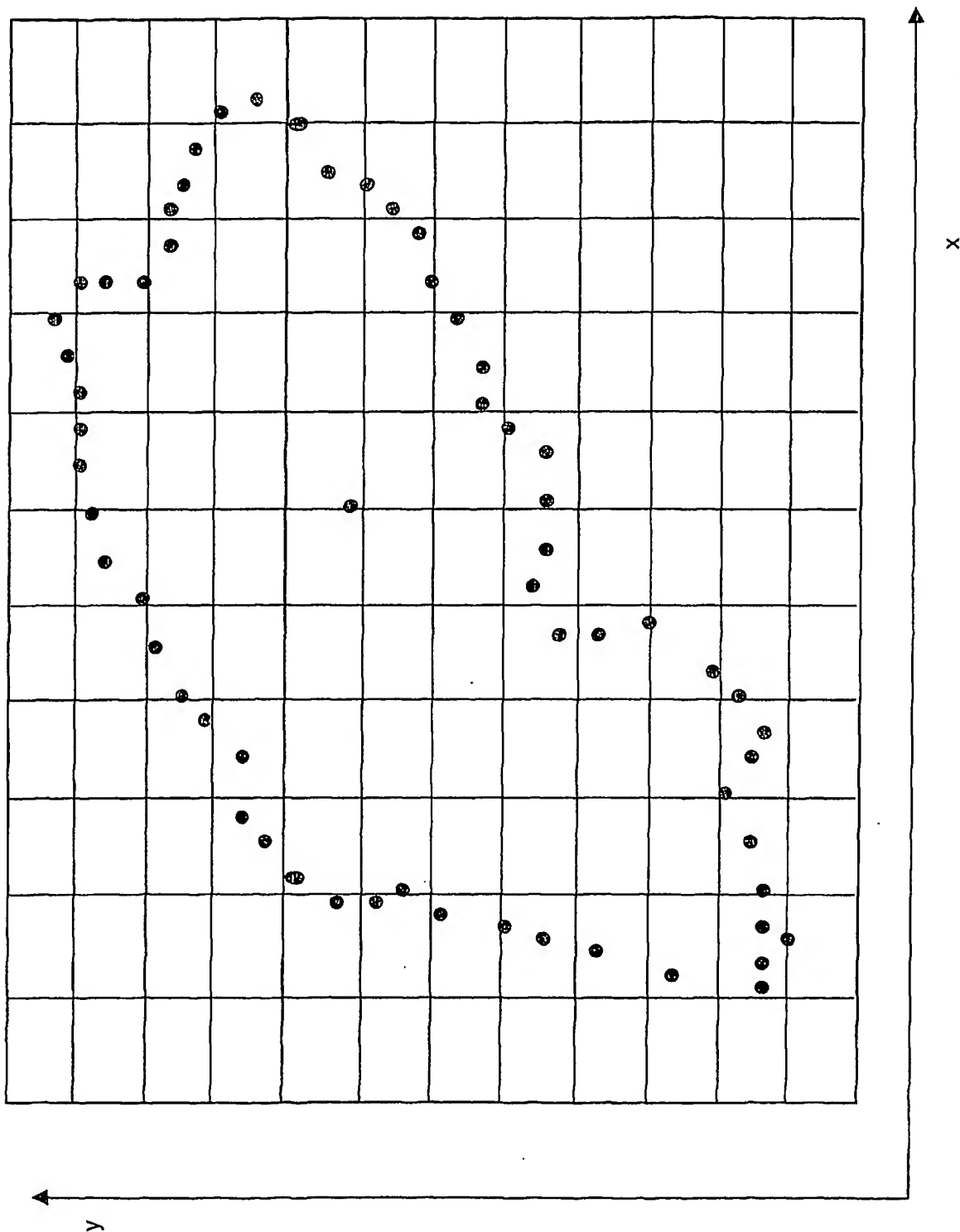


Fig. 3

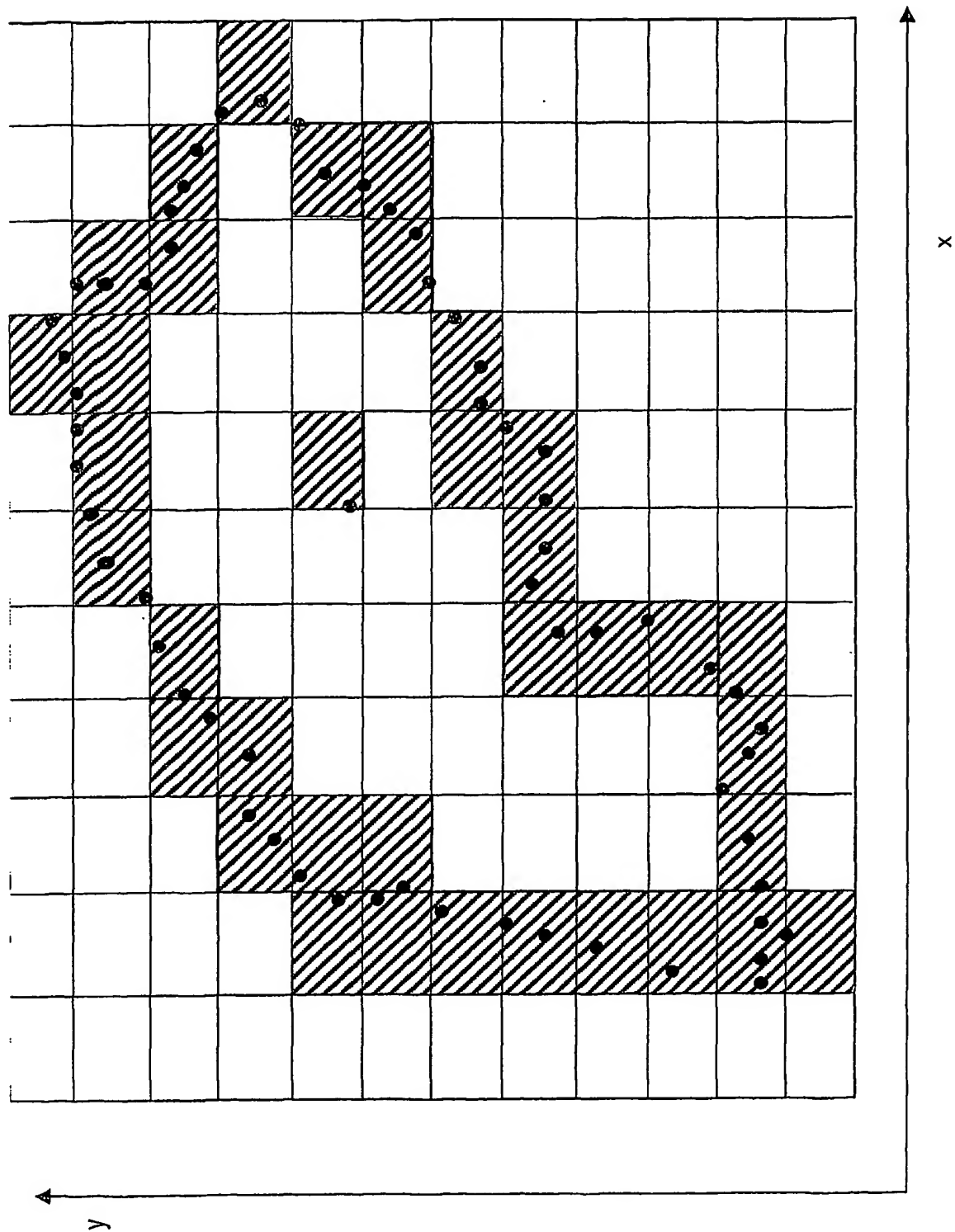


Fig. 4

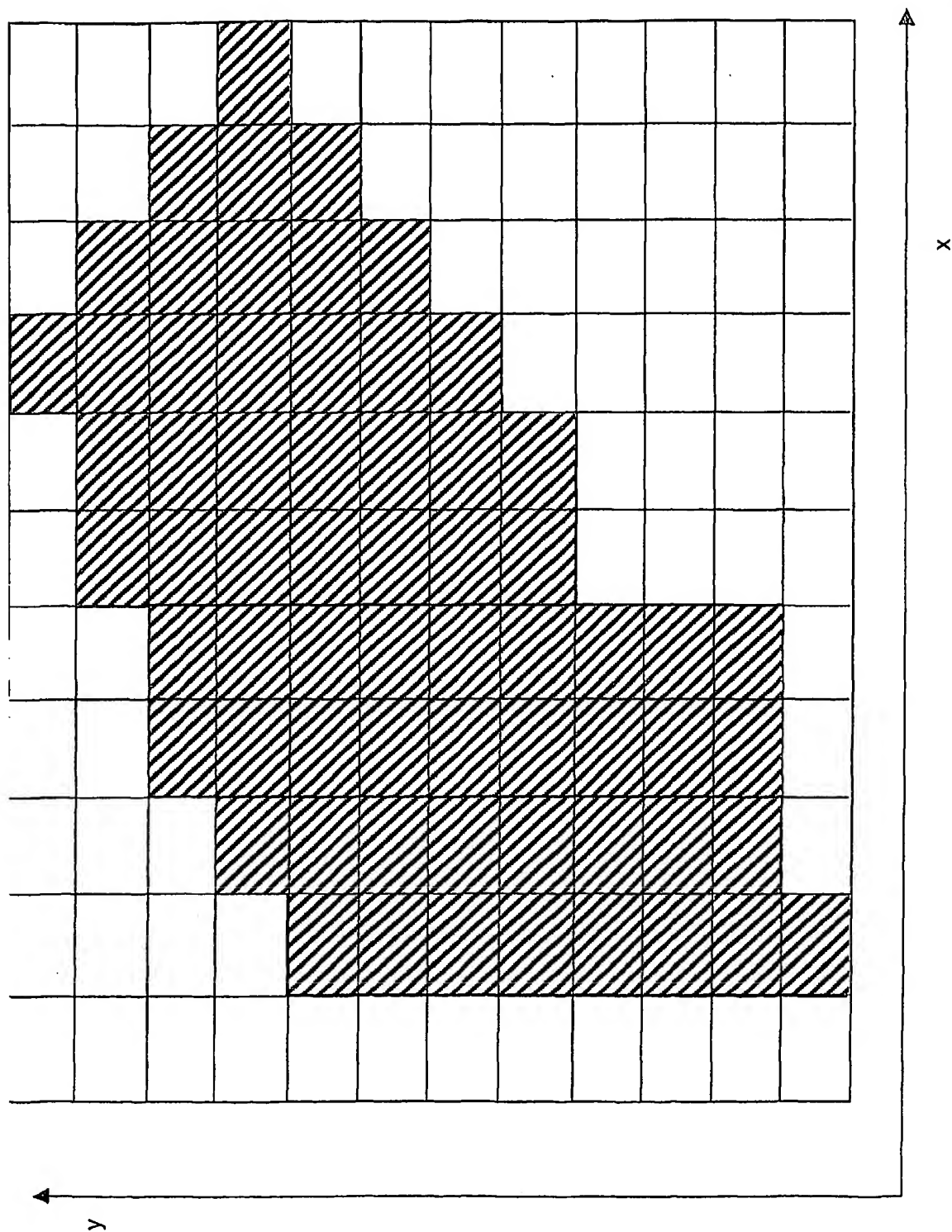


Fig. 5

6/6

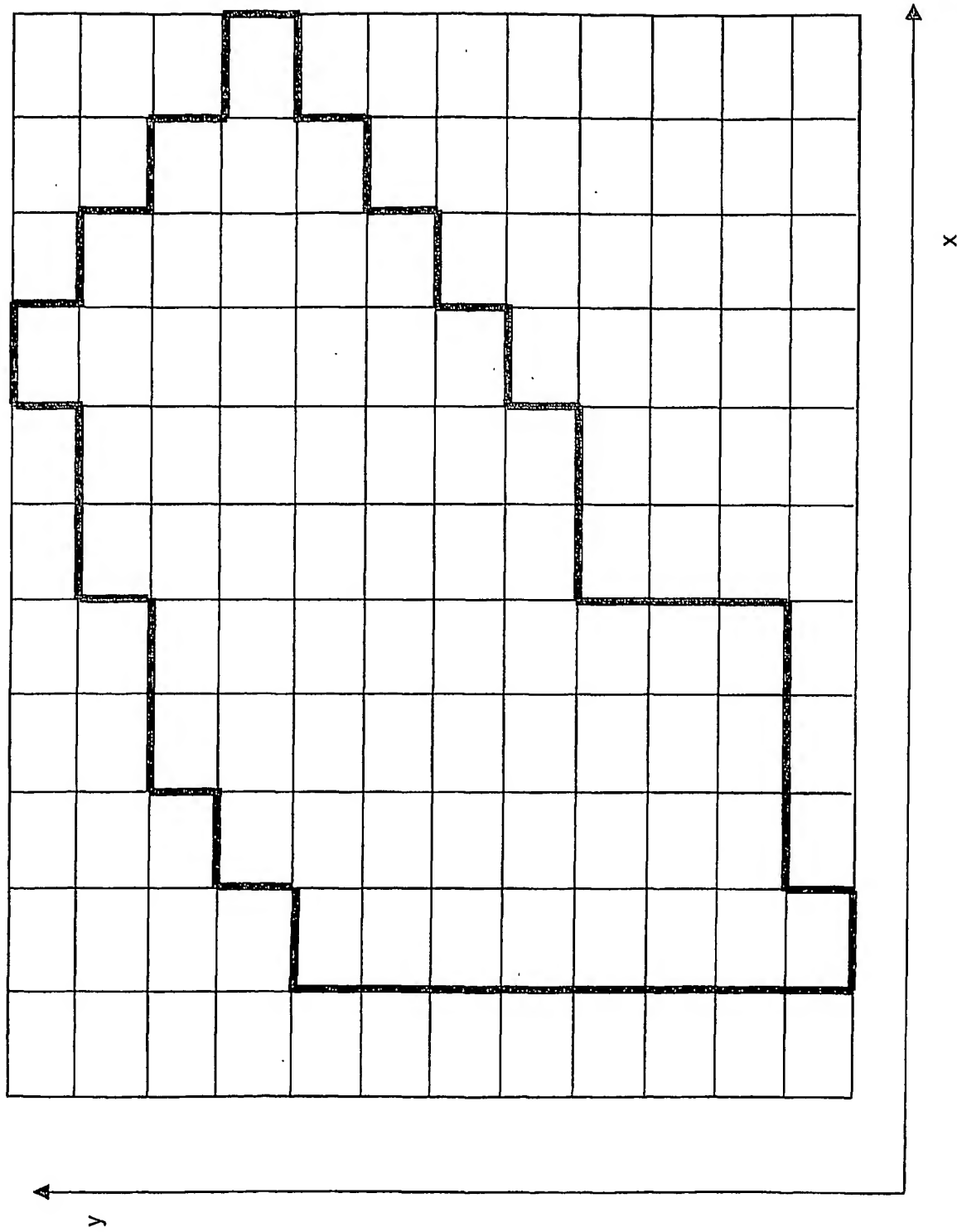


Fig. 6

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International Application No
PCT/EP2004/014135

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER
IPC 7 G06T17/10 G06T17/20

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)
IPC 7 G06T

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practical, search terms used)

EPO-Internal, INSPEC

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category *	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	ANDUJAR C ET AL: "Topology-reducing surface simplification using a discrete solid representation" ACM TRANSACTIONS ON GRAPHICS ACM USA, vol. 21, no. 2, 2 April 2002 (2002-04-02), pages 88-105, XP002321991 ISSN: 0730-0301 the whole document	1-7
X	FOLEY J D ET AL: "COMPUTER GRAPHICS: PRINCIPLES AND PRACTICE, Chapter 12 Solid Modeling" COMPUTER GRAPHICS. PRINCIPLES AND PRACTICE, READING, ADDISON WESLEY, August 1995 (1995-08), pages 533-562, XP002321992 the whole document	1
-/--		

☒ Further documents are listed in the continuation of box C.

☐ Patent family members are listed in annex.

* Special categories of cited documents:

- *A* document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance
- *E* earlier document but published on or after the international filing date
- *L* document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)
- *O* document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means
- *P* document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

- *T* later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention
- *X* document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone
- *Y* document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art.
- *Z* document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

23 March 2005

Date of mailing of the international search report

06/04/2005

Name and mailing address of the ISA

European Patent Office, P.B. 5818 Patentlaan 2
NL - 2280 HV Rijswijk
Tel. (+31-70) 340-2040, Tx. 31 651 epo nl,
Fax: (+31-70) 340-3016

Authorized officer

Reise, F

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International Application No
PCT/EP2004/014135

C.(Continuation) DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category *	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	<p>STEFFEN MARBURG: "SIX BOUNDARY ELEMENTS PER WAVELENGTH: IS THAT ENOUGH?" JOURNAL OF COMPUTATIONAL ACOUSTICS, vol. 10, no. 1, 2002, pages 25-51, XP008044679 the whole document</p> <p>-----</p>	4
A	<p>ZELINKA S ET AL: "Permission grids: practical, error-bounded simplification" ACM TRANSACTIONS ON GRAPHICS ACM USA, vol. 21, no. 2, 2 April 2002 (2002-04-02), pages 207-229, XP002321994 ISSN: 0730-0301 the whole document</p> <p>-----</p>	

INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Internationales Aktenzeichen

PCT/EP2004/014135

A. KLASSTIFIZIERUNG DES ANMELDUNGSGEGENSTANDES
IPK 7 G06T17/10 G06T17/20

Nach der Internationalen Patentklassifikation (IPK) oder nach der nationalen Klassifikation und der IPK

B. RECHERCHIERTE GEBIETE

Recherchiertes Mindestprüfstoff (Klassifikationssystem und Klassifikationssymbole)
IPK 7 G06T

Recherchierte aber nicht zum Mindestprüfstoff gehörende Veröffentlichungen, soweit diese unter die recherchierten Gebiete fallen

Während der Internationalen Recherche konsultierte elektronische Datenbank (Name der Datenbank und evtl. verwendete Suchbegriffe)

EPO-Internal, INSPEC

C. ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN

Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
X	ANDUJAR C ET AL: "Topology-reducing surface simplification using a discrete solid representation" ACM TRANSACTIONS ON GRAPHICS ACM USA, Bd. 21, Nr. 2, 2. April 2002 (2002-04-02), Seiten 88-105, XP002321991 ISSN: 0730-0301 das ganze Dokument	1-7
X	FOLEY J D ET AL: "COMPUTER GRAPHICS: PRINCIPLES AND PRACTICE, Chapter 12 Solid Modeling" COMPUTER GRAPHICS. PRINCIPLES AND PRACTICE, READING, ADDISON WESLEY, August 1995 (1995-08), Seiten 533-562, XP002321992 das ganze Dokument	1

☒ Weitere Veröffentlichungen sind der Fortsetzung von Feld C zu entnehmen

☐ Siehe Anhang Patentfamilie

* Besondere Kategorien von angegebenen Veröffentlichungen :

A Veröffentlichung, die den allgemeinen Stand der Technik definiert, aber nicht als besonders bedeutsam anzusehen ist

E Älteres Dokument, das jedoch erst am oder nach dem internationalen Anmeldedatum veröffentlicht worden ist

L Veröffentlichung, die geeignet ist, einen Prioritätsanspruch zweifelhaft erscheinen zu lassen, oder durch die das Veröffentlichungsdatum einer anderen im Recherchenbericht genannten Veröffentlichung belegt werden soll oder die aus einem anderen besonderen Grund angegeben ist (wie ausgeführt)

O Veröffentlichung, die sich auf eine mündliche Offenbarung, eine Benutzung, eine Ausstellung oder andere Maßnahmen bezieht

P Veröffentlichung, die vor dem internationalen Anmeldedatum, aber nach dem beanspruchten Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist

T Spätere Veröffentlichung, die nach dem internationalen Anmeldedatum oder dem Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist und mit der Anmeldung nicht kollidiert, sondern nur zum Verständnis des der Erfindung zugrundeliegenden Prinzips oder der ihr zugrundeliegenden Theorie angegeben ist

X Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann allein aufgrund dieser Veröffentlichung nicht als neu oder auf erfinderscher Tätigkeit beruhend betrachtet werden

Y Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann nicht als auf erfinderscher Tätigkeit beruhend betrachtet werden, wenn die Veröffentlichung mit einer oder mehreren anderen Veröffentlichungen dieser Kategorie in Verbindung gebracht wird und diese Verbindung für einen Fachmann naheliegend ist

S Veröffentlichung, die Mitglied derselben Patentfamilie ist

Datum des Abschlusses der Internationalen Recherche

23. März 2005

Absendedatum des Internationalen Recherchenberichts

06/04/2005

Name und Postanschrift der Internationalen Recherchenbehörde
Europäisches Patentamt, P.B. 5818 Patentlaan 2
NL - 2280 HV Rijswijk
Tel. (+31-70) 340-2040, Tx. 31 651 epo nl,
Fax: (+31-70) 340-3016

Bevollmächtigter Bediensteter

Reise, F

INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Internationales Aktenzeichen

PCT/EP2004/014135

C.(Fortsetzung) ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN

Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Beitr. Anspruch Nr.
A	<p>STEFFEN MARBURG: "SIX BOUNDARY ELEMENTS PER WAVELENGTH: IS THAT ENOUGH?" JOURNAL OF COMPUTATIONAL ACOUSTICS, Bd. 10, Nr. 1, 2002, Seiten 25-51, XP008044679 das ganze Dokument</p> <p>-----</p>	4
A	<p>ZELINKA S ET AL: "Permission grids: practical, error-bounded simplification" ACM TRANSACTIONS ON GRAPHICS ACM USA, Bd. 21, Nr. 2, 2. April 2002 (2002-04-02), Seiten 207-229, XP002321994 ISSN: 0730-0301 das ganze Dokument</p> <p>-----</p>	